

계시별 전기 요금제하의 에너지 절약을 위한 건물 냉방 제어 방법의 개발

Development of a Novel Air-Conditioning Method for Energy Savings in Commercial Building Under Time of Use Electricity Pricing

노성준* · 전정표** · 김광호†
(Sung-Jun Noh · Jeong-Pyo Jeon · Kwang-Ho Kim)

Abstract -The commercial buildings are consuming about 30% of total energy used in Korea. And a large amount of energy consumption in commercial buildings is consumed by HVAC(Heating, Ventilation, Air Conditioning) system. Therefore, if we can reduce the energy consumption in HVAC or air-conditioning system in commercial buildings, the overall energy consumption in Korea can be reduced. Currently, an electricity charge called Time of Use (TOU) is applied to typical commercial buildings. This paper proposes the novel energy management method where the temperature setting of air-conditioning system are adjusted to minimize the use of electrical energy while indoor comfort level is retained. The simulation test for a typical commercial building shows that the proposed method gives over 10% savings in electricity bills and electricity consumption compared to the conventional air-conditioning method.

Key Words : Energy saving, Commercial building, Time of use electricity charge, Air-conditioning, Optimization

1. 서론

세계적으로 효율적인 에너지 소비에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 우리나라도 마찬가지로 에너지 절감에 대한 관심이 계속 증가하고 있다. 우리나라는 1차 에너지의 사용량 세계 10위, 전력사용량 세계 11위의 세계적인 에너지 다소비 국가이자 에너지 부족국가이다. 특히, 우리나라의 총에너지 사용량 중 약 30%가 건물부분에서 소비되고 있는데 특히 일반건물에 있어서는 연간 전력소비량의 약 32%, 8월 기준 전력소비량의 약 47%를 냉방공조설비가 소비하고 있다[1]. 그러므로 건물 냉방에 대한 효율적인 운영은 전체 에너지 절감에 큰 기여를 할 수 있으며 이는 곧 국가적인 측면의 효율적인 에너지사용에도 큰 영향을 줄 수 있게 된다. 조명, 동력, 사무용과 같은 부하에 대해서도 에너지절감이 가능하지만, 본 논문에서는 상대적으로 온도조절을 통한 부하제어가 용이하고 그 효과도 크게 얻을 수 있는 냉방공조설비를 우선적으로 선정하여 이에 대한 에너지 절약방법을 모색하였다. 현재의 우리나라의 전기 요금제도는 주택용, 산업용, 일반용, 농사용, 교육용, 가로등 6가지 용도로 분류하

고 차등요금을 적용하는 “용도별 차등요금제”를 사용하고 있다. 이러한 용도별 차등요금제는 비생산 부문의 에너지 절약을 유도하기 위해 일반용과 주택용에 대해서는 높은 요금을 부과하고 산업 경쟁력 향상 및 농·어촌 경제 지원을 위해 산업용과 농사용에 대하여는 낮은 요금을 부과하는 것이다. 이 중 일반적인 상업용 건물에서 사용되는 일반용 요금제는 ToU(Time of Use)라 불리는 계시별 요금제를 사용하고 있다. 우리나라의 경우 일반용 요금제는 갑과 을로 나뉘어 시행되고 있는데 갑의 경우 여름/봄가을/겨울 등 계절별 3구간으로 나뉘어 요금이 다르게 책정되어 있으며, 을의 경우 하루를 최대부하/중간부하/경부하 등의 3단계 시간으로 구분하여 차등 전기요금 단가를 적용되고 있다. 이러한 계시별 요금제는 단순히 전력 사용량에 따라 전기요금을 적용하는 경우에 달리 시간대별 전기요금 단가가 다르게 적용되기 때문에 보다 효율적이고 탄력적인 전력소비를 필요로 한다. 본 논문에서는 건물의 HVAC(Heating Ventilation and Air Conditioning) 시스템 중에서 건물의 냉방을 담당하고 있는 냉방시스템인 칠러(Chiller)를 대상으로, 현재 건물에 적용되고 있는 계시별 요금제하에서 적정 실내온도를 유지하는 범위에서 전기요금을 최소화할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 본 논문에서 적용한 냉방시스템은 일반적으로 상업용 건물에서 많이 사용하고 있는 형태로 냉수 출구온도에 조절하여 원하는 실내온도를 유지하도록 운용된다. 따라서 냉수 출구온도를 어떻게 설정하느냐에 따라 전력 사용량의 차이가 발생하는 특징을 가지고 있다. 즉, 냉수 출구온도가 낮아지면 큰 냉방 효과를 얻을 수 있지만 전력 사용량이 증가하며 반대로 냉수 출구온도가 높아지면 전력 사용량은 감소하지만 대신 적은 냉방 효과를 얻게 된다. 그러나 기존의 건물에서의 냉방시스템에 대한 운용방법은 이러한 ToU

* Residential Construction Division, Lotte Engineering and Construction, Korea

** Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Kangwon National University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Kangwon National University, Korea

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr

Received : September 19, 2012; Accepted : January 7, 2013

요금제의 기능에 부합하기 힘든 특징을 가지고 있다. 대부분의 건물에서의 냉수 출구온도는 고정적인 값으로 운용된다. 즉, 여름철 실내 설정온도를 특정 값으로 고정하고 이를 만족하기 위하여 냉방시스템을 on/off한다. 그러나 이러한 냉방시스템 운용방법은 변동적인 ToU 전기요금 단가를 적절히 반영하지 못하며 경우에 따라 높은 전기요금이 발생할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 적정 실내온도를 유지하는 범위에서 전기요금을 최소화하기 위한 냉방시스템의 최적 운용방법을 제안하는 바이다. 제안된 제어방법은 ToU요금제에서 시간대별 최적의 냉수 출구온도를 산출하고 이를 통하여 운용함으로써 최소의 전기요금을 산출하도록 한다.

2. 냉방시스템의 개요 및 특성

2.1 냉방시스템의 기본 원리

오늘날 대부분의 일반 대형건물에는 HVAC 시스템이라 불리는 공조 설비가 설치되어 있다. HVAC 시스템은 크게 2부분으로 나누어 질 수 있는데 건물의 환기 등을 담당하는 환기 시스템 부분과 냉·난방 시스템으로 구분 할 수 있다. 본 논문에서는 건물의 냉방시스템 부분에 대한 제어방법을 다룬다. 건물의 냉방시스템에 사용되는 냉동기는 여러 종류가 사용되는데 본 논문에서는 냉수 출구 온도에 따라 전력 사용량이 변화하게 되는 형태의 냉동기를 대상으로 하였다.

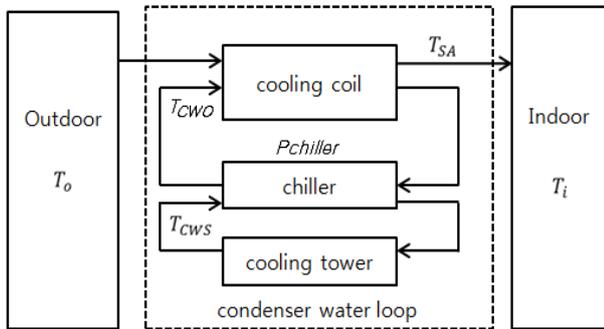


그림 1 냉방시스템의 냉수순환도
Fig. 1 Chilled water flow of cooling system

냉방시스템의 기본적인 운전 방식을 그림 1에 간략하게 표현하였다[2]. 본 논문에 사용된 냉방시스템은 차가운 냉수를 이용하여 실내를 냉방하는 것으로 칠러(chiller)라 불리는 냉방시스템에서 냉매를 이용하여 물의 온도를 낮추고 차가운 냉수를 냉각코일(cooling coil)에 공급하게 된다. 높은 온도의 외부 공기는 냉방시스템을 통해 냉각코일에 공급된 차가운 냉수와 만나게 되고 여기서 새롭게 만들어진 차가운 공기가 실내로 유입되게 된다. 이 때 실내로 유입되는 차가운 공기가 실내를 냉방하도록 되어 있다. 따라서 외부공기 온도와 낮은 온도의 냉수 출구온도(T_{CWO})가 실내 냉방의 정도를 결정하는 주요한 요인이 된다. 그러나 외부공기 온도는 인위적으로 설정할 수 있는 값이 아니기 때문에 냉방시스템의 전력 사용량에 직접적인 제어요소가 되는 것은 바로 냉수 출구온도라고 할 수 있다. 따라서 최적의 냉수 출

구온도 설정을 통하여 실내 냉방은 쾌적하게 하면서 최소의 전력 사용량을 유지할 수 있는 방법을 찾을 필요가 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 제어전략은 전일 기상정보로부터 다음날의 실외온도 데이터를 전송받고 이를 이용하여 다음날의 시간대별 최적의 냉수 출구온도를 산출하게 된다. 냉수 출구온도에 대한 최적의 설정은 전력사용량을 최소화 하는 결정적인 요인이 될 것이다.

2.2 냉방시스템의 전력 사용량 함수

이번 절에서는 냉수 출구온도에 따른 냉방시스템의 전력 사용량에 대한 수식적 모델을 제시한다. 아래의 수식은 냉방시스템의 전력사용량을 결정하는 함수식이다[3].

$$P_{chiller,t} = CAP_D \times CAP_t \times EIR_{FT,t} \times EIR_{PLR,t} \quad (1)$$

여기서,

$P_{chiller,t}$: t시간의 냉방시스템의 전력 사용량(kWh)

CAP_D : 냉방시스템의 정격 냉방 능력(USRT)

CAP_t : t시간의 냉방시스템 냉방 능력 함수

$EIR_{FT,t}$: t시간의 냉수 및 냉각수 온도의 함수에 대한 전기적 입력 비율

$EIR_{PLR,t}$: t시간의 부분 부하 비율에 따른 전기적 입력 비율

특정시간의 냉방시스템의 전력 사용량은 식(1)와 같이 표현 될 수 있다. 먼저 t시간에서의 냉방시스템의 냉방 능력을 구하기 위해 정격 냉방 능력에 CAP_t 함수를 곱하게 된다. 그러면 t 시간에서의 냉방시스템 냉방 능력이 산출되고 이를 전기적인 수치로 변화시키기 위해 $EIR_{FT,t}$ 함수를 곱하여 주게 된다. 또한 실내 냉방 용량을 냉방시스템의 냉방 능력을 이용하여 나누게 되면 PLR(Part Load Ratio)라 불리는 부분 부하 비율을 구할 수 있게 되는데 이를 다시 전기적인 수치로 변화시켜 주기 위해서 $EIR_{PLR,t}$ 함수를 곱하게 되면 최종적으로 t 시간에서의 냉방시스템의 전력 사용량을 얻을 수 있다. 이 식과 같이 냉방시스템의 전력 사용량을 냉수 및 냉각수 온도에 대한 함수로 정의되며 최적 냉수 출구온도를 산출하기 위한 최적화 식에 사용한다. CAP_t 는 t 시간에서의 냉방시스템의 냉방 능력 함수를 나타낸다. 냉방 능력은 해당 냉방시스템이 실내 공간을 얼마만큼 냉방 할 수 있는가를 나타내는 능력으로서 CAP_t 함수는 냉방시스템의 정격 냉방 능력에 곱해져 t시간에서 냉방 능력을 산출하는데 사용된다. 이 함수는 냉수 출구 온도와 냉각수온도에 관한 식으로 표현 할 수 있다.

$$CAP_t = a_1 + a_2 T_{CWO,t} + a_3 T_{CWO,t}^2 + a_4 T_{CWS,t} + a_5 T_{CWS,t}^2 + a_6 T_{CWO,t} T_{CWS,t} \quad (2)$$

여기서,

$T_{CWO,t}$: t시간의 냉수 출구온도(°C)

$T_{CWS,t}$: t시간의 냉각수 공급온도(°C)

$EIR_{FT,t}$ 은 냉방시스템의 냉방 능력을 전기적인 수치, 즉 전력 사용량으로 변환 시켜주기 위한 일종의 보정 함수이다. 이 함수는 CAP_t 와 마찬가지로 냉수 출구 온도 및 냉각수 온도에 관한 식으로 표현 할 수 있다.

$$EIR_{FT,t} = b_1 + b_2 T_{CWO,t} + b_3 T_{CWO,t}^2 + b_4 T_{CWS,t} + b_5 T_{CWS,t}^2 + b_6 T_{CWO,t} T_{CWS,t} \quad (3)$$

$EIR_{PLR,t}$ 은 부분 부하 비율을 전기적인 수치로 변환 시켜주기 위한 함수이다. 여기서 부분 부하 비율은 실내 냉방 용량을 냉방시스템의 냉방 능력으로 나누는 것으로 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$EIR_{PLR,t} = c_1 + c_2 PLR_t + c_3 PLR_t^2 \quad (4)$$

$$PLR_t = \frac{Q_t}{CAP_D CAP_t} \quad (5)$$

여기서,

Q_t : t시간의 실내 냉방부하 (kcal/h)

CAP_D : 냉방시스템 냉방 능력 (USRT)

또한 위 식들에서 포함된 a, b, c 각 파라미터는 각 냉방시스템의 고유 특성 계수를 나타내며, 그 값은 해당 냉방시스템의 데이터시트를 통해 구할 수 있다[4].

2.3 실내온도에 대한 함수

건물의 실내 냉방을 실시하는 경우, 냉방시스템은 냉방수준이 과하거나 부족하지 않도록 다음 시간의 실내 온도를 예측하여 적절한 수준에서 선제적으로 운전하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 식(6)과 같이 냉방시스템 가동에 따른 다음 시간의 실내 온도를 추정하였다[5].

$$T_{i,t+1} = e T_{i,t} + (1-e) T_{sa,t} \quad (6)$$

여기서,

$T_{i,t+1}$: 다음 시간 실내 온도(°C)

$T_{i,t}$: t시간의 실내 온도(°C)

e : 실내 온도 영향 계수 ($e = \exp^{-1/TC}$)

$T_{sa,t}$: 실내 공급 공기 온도(°C)

T : 열저항(m^2K/W)

C : 열용량(W/m^3K)

e 는 실내 온도 영향 계수로서 다음 시간의 실내 온도 변화에 영향을 끼치며 건물의 열용량 및 열저항 특성에 따라서 그 값이 결정되며, $T_{sa,t}$ 는 외부공기가 냉각코일을 만나 차가워진 상태에서 실내로 공급되는 공기의 온도를 의미한다. 다음 시간의 실내 온도 추정치는 식(6)과 같이 T_{sa} 와 이전 실내 온도의 관계를 통해 구할 수 있다. 여기서 T_{sa} 는 일반적으로 다음과 같이 정의할 수 있다[6].

$$T_{sa,t} = (1-\eta) T_{o,t} + \eta T_{CWO,t} \quad (7)$$

$$T_{i,t+1} = e T_{i,t} + (1-e) T_{o,t} \quad (8)$$

여기서,

$T_{o,t}$: t시간의 실외 온도(°C)

η : 물-공기 열교환기 효율

여기서 사용된 열교환기 효율은 외부 공기가 냉각코일을 지나게 될 때 어느 정도 냉각이 되는지를 보여주는 열교환기의 성능지표로 이 효율이 높을수록 냉수 출구온도가 대부분 실내로 유입되는 공기에 전달되어 더 큰 냉방 효과를 볼 수 있게 된다. 반대로 효율이 작아질수록 낮은 냉방 효과로 인해 실내 냉방이 제대로 이루어지지 않아 전력 사용량이 상대적으로 증가하게 된다. 열교환기의 효율은 사용하는 냉방시스템의 특성 데이터를 사용하였다. 실내 냉방이 가동되지 않을 경우는 별도로 식(8)과 같은 식을 사용하여 다음 시간의 실내온도를 추정한다. 식(8)에서 알 수 있듯이 실내 냉방이 이루어지지 않을 경우는 실외온도(T_o)가 다음 시간의 실내온도를 결정하는 주요 요소가 된다.

3. 최적 냉방시스템 제어방법

3.1 전기요금 최소화를 위한 목적함수

건물의 냉방시스템에서 소비되는 전력사용량에 대한 전기요금을 최소화하기 위한 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

Minimize Cost:

$$EC_{chiller} = \sum_{t=1}^{24} P_{chiller,t} \times C_{g,t} \quad (9)$$

여기서,

$EC_{chiller}$: 일일 냉방시스템에서 발생한 전기요금(원)

$P_{chiller,t}$: t시간의 냉방시스템의 전력 사용량(kWh)

$C_{g,t}$: t시간의 ToU 요금단가(원/kWh)

위에서 정의한 것처럼 하루 동안의 일정 시간 냉방시스템 사용으로 발생한 전기요금은 냉방시스템의 전력사용량과 해당 시간대의 전기요금 단가를 곱해서 쉽게 얻을 수 있으며, 이 전기요금을 최소화하도록 목적함수를 정의하게 된다. 앞 절에서 기술한 바와 같이 계시별 요금제하에서는 시간대별로 전기요금 단가가 달라지기 때문에 상대적으로 단가가 낮은 시간대에 높은 수준의 냉방을 실시하고 단가가 높은 시간대에 냉방을 줄인다면 전기요금을 절감할 수 있다. 그러나 문제는 단가가 높은 시간대 즉 전력수요가 많이 발생하는 최대부하 시간대가 일반적으로 냉방수요가 많은 시간이기 때문에 실내 열쾌적도를 고려한다면 단순히 단가에 따라 냉방시스템을 제어할 수 없다는 점이다. 따라서 이러한 점이 실내 열쾌적도와 경제성을 함께 고려한 최적화 제어가 필요한 이유이다. 본 연구에서는 서론에서도 약속한 것처럼 냉방시스템의 냉수 출구온도로 정의된 전력사용량 함수를

이용하여 최적의 냉방부하 제어를 수행하는 방법을 제시하고자 한다.

3.2 제약조건

3.1절에서 정의된 냉수 출구온도에 따른 냉방시스템의 소비전력량 산출하기 위한 최적화 함수식에 대한 제약조건은 다음과 같다.

Subject to:

$$P_{chiller,min} \leq P_{chiller,t} \leq P_{chiller,max} \quad (10)$$

$$T_{CWO,min} \leq T_{CWO,t} \leq T_{CWO,max} \quad (11)$$

여기서,

- $P_{chiller,min}$: 냉방시스템 최소 전력사용량(kWh)
- $P_{chiller,max}$: 냉방시스템의 최대 전력사용량(kWh)
- $T_{CWO,min}$: 최저 냉수 출구 온도 (°C)
- $T_{CWO,max}$: 최고 냉수 출구 온도 (°C)

냉수 출구 온도 변화에 따라 실내에 공급되는 공기의 온도는 변화하며, 따라서 냉수 출구온도는 냉방시스템에서 소비되는 전력사용량 뿐만 아니라 실내온도를 결정하는 주요 변수이다. 따라서 냉수 출구온도의 제어는 기본적으로 실내 거주자들의 열쾌적도를 저해하지 않는 실내온도를 만족하는 범위에서 결정되어야 한다. 그러나 일반적으로 쾌적함을 느끼는 실내 온도의 범위는 주관적인 요소로 일반화된 값을 정형화하는 것은 상당히 까다로운 일이므로, 본 논문에서는 미국공조냉동공학회(ASHRAE)에서 권고한 여름철 쾌적온도 범위를 참조하여 실내온도 범위를 22°C ~ 24°C으로 설정하였다[7].

Subject to:

$$T_{i,min} \leq T_{i,t} \leq T_{i,max} \quad (12)$$

여기서,

- $T_{i,min}$: 쾌적함을 느끼는 최저 실내 온도 (°C)
- $T_{i,max}$: 쾌적함을 느끼는 최고 실내 온도 (°C)

4. 사례 연구

4.1 최적화 기법

본 논문에서 최적화 제어를 위해 사용된 최적화 기법은 비선형함수 최적화 부문에서 가장 강력하다고 알려진 SQP (Sequential Quadratic Programming) 알고리즘을 사용하였다. SQP 알고리즘은 비선형 목적함수(9) 및 제약조건(10~12)를 테일러급수 전개를 이용하여 각각 2차식과 1차식으로 근사시킨 후 문제를 해결하는 방법이다. SQP법의 최적 함수식은 다음과 같이 테일러 근사를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다[8].

Minimize:

$$q(x) = \frac{1}{2}d^T H d + \nabla f(x_k)^T d \quad (13)$$

Subject to:

$$\nabla g_i^T + g_i^k \leq 0, i = i = m_e + 1, \dots, m \quad (14)$$

여기서, H는 목적함수 식(9)에 대한 Hessian행렬을 나타내며, x_k 는 현재의 반복단계에서의 변수값으로 본 연구에서의 실제 변수값인 냉수출구온도($T_{CWO,t}$)를 나타낸다. SQP법은 비선형 목적함수의 최적해를 산출하기 위하여 2차 방정식의 해를 구하는 반복계산을 기반으로, 그 탐색방향으로의 강하함수를 최소화하여 이동거리를 구하는 방식이다. 매 반복에서 변수는 $x_{k+1} = x_k + a_k d_k$ 에 의하여 변화하며, a_k 는 이동거리를 나타낸다. 만약 여기서 최적해가 산출되면 계산이 종료되며, 만약 해가 산출되지 않으면 Hessian행렬은 BFGS(Broyden Fletcher Goldfarb Shanno Method)에 의해 개선되어 추가적인 반복계산을 수행하게 된다.

4.2 사례연구의 개요

이번 절에서는 제안된 냉방시스템의 제어전략에 대한 효과를 입증하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 제안된 냉방시스템의 제어방법과 기존 냉방시스템의 제어방법을 비교하기 위하여 서울지역의 상업용 건물을 대상으로 선정하였으며, 대상 건물의 면적은 11,642 m^2 이고 열용량과 열저항은 각각 12.73 W/m^3K , 0.762 m^2K/W 으로 일반적인 상업용 건물의 수치를 사용하였다 [9]. 건물의 냉방시스템에 대한 데이터는 해당 냉방시스템의 데이터 시트를 참조하여 최대 소비전력은 237kW, 냉방용량은 350 USRT, 냉수 유량은 3,529 LPM으로 설정하였다[10]. 제어방법의 경우 일반적인 건물에서는 특정온도를 적정온도로 설정하고 해당온도가 유지되도록 고정적인 냉수 출구온도로 냉방시스템을 가동하는 점을 고려하여 기존의 냉방시스템 제어방법은 고정된 10°C의 냉수 출구온도를 이용하여 실내온도를 23°C로 만족하기 위하여 23.25°C ~ 22.75°C를 기준으로 on/off를 반복하는 것으로 설정하였다.

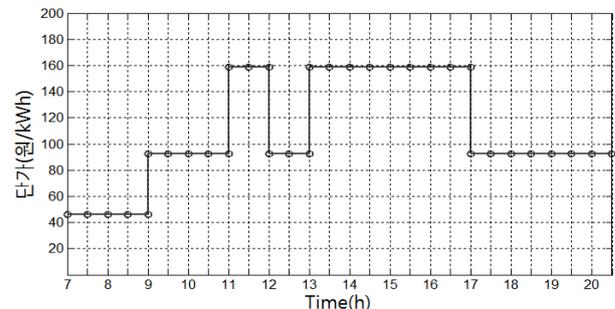


그림 2 계시별 요금 단가
Fig. 2 ToU electricity charge

이와 달리 제안된 제어방법에서는 실내온도의 제어범위를 미국공조냉동공학회의 여름철 쾌적온도를 참조한 22°C~24°C

범위에서 보다 유동적으로 제어되며, 냉수 출구온도 또한 고정적인 값이 아니라 $7^{\circ}C \sim 12^{\circ}C$ 의 범위에서 기존방법 보다 유동적으로 제어된다. 또한 일반적인 상업용 건물의 일일 거주시간을 고려하여 07시부터 20시까지, 30분 단위로 제어하는 것으로 설정하였다. 적용 전기요금은 현재 상업용 건물에 적용되는 일반용(을, 고압A 선택1)을 적용하였으며, 위의 그림 2와 같이 시간대별로 경/중간/최대부하 시간대의 3 단계로 구분되어 차등단가를 적용받는다[11].

4.3 일간 운행결과

먼저 제안된 제어방법에 따른 효과를 세부적으로 평가하기 위해서 2010년 8월 22일을 선정하여 1일 시뮬레이션을 진행하였다. 이날 서울지역의 평균 실외온도는 $28.7^{\circ}C$, 최고 실외온도는 $32.1^{\circ}C$ 로 관측되었다[12].

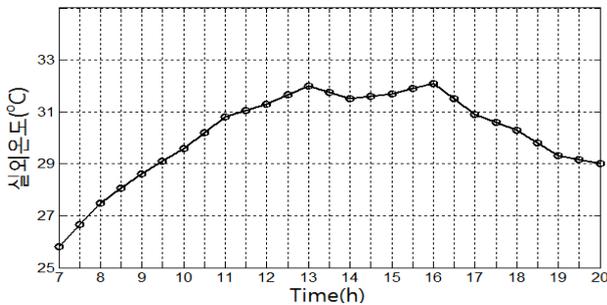


그림 3 서울지역 실외온도
Fig. 3 Outdoor temperature in Seoul

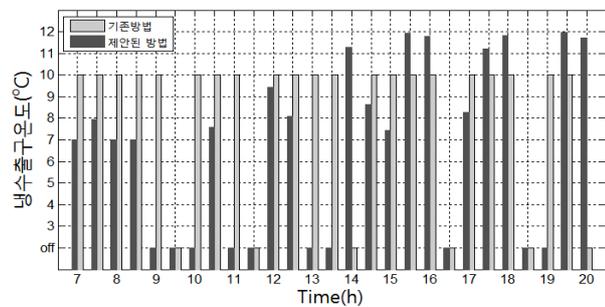


그림 4 시간대별 냉수출구온도 변화
Fig. 4 The hourly temperature of chilled water outlet

위의 그림 4는 8월 22일 오전 7시부터 오후 8시까지 시간당 냉수 출구온도를 비교한 그래프이다. 기존의 제어방법의 경우 ToU 단가의 변화와 관계없이 일정한 실내온도를 만족하기 위하여 운행하는 반면, 제안된 제어방법의 경우, ToU 단가가 낮은 경·중간부하 시간동안 낮은 냉수 출구온도를 적용하여 최대한 사전냉방을 실시하며, 최대 부하시간 동안에는 높은 냉수 출구온도를 적용함으로써 효율적인 냉방시스템 가동이 이루어지도록 제어한다.

아래의 그림 5, 6는 시간당 실내온도 및 냉동기의 전력사용량 변화를 보여준다. 기존 제어방법의 경우 그림 5와 같이 사전에 설정된 실내온도인 $23^{\circ}C(23.25 \sim 22.75^{\circ}C)$ 를 계속

유지하는 반면, 제안한 방법은 최대 부하시간대에 냉방시스템의 가동을 최대한 피하기 위하여 요금단가가 저렴한 경부하 시간대(7 ~ 9)에 최대한 실내온도를 낮게 유지하는 사전냉방을 실시하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 기존 제어방법은 그림 6과 같이 전기요금 단가가 높은 최대부하 시간에 총 1시간 30분의 정지를 한 반면, 제안된 제어방법의 경우 총 2시간 30분 동안 냉방시스템의 가동을 정지시켰다. 또한 이와 함께 최대 부하시간 동안 높은 온도의 냉수 출구온도를 설정함으로써 이 시간동안 소비되는 전력량을 최대한 절감하도록 제어하는 것으로 나타났다.

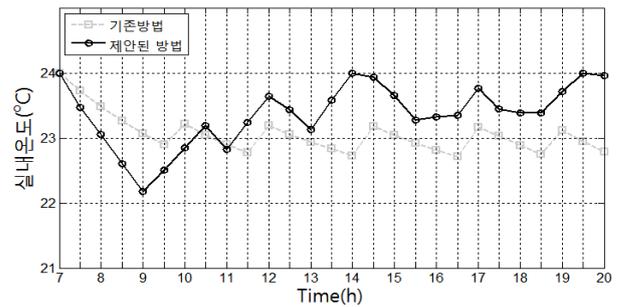


그림 5 시간대별 실내온도
Fig. 5 The hourly indoor temperature

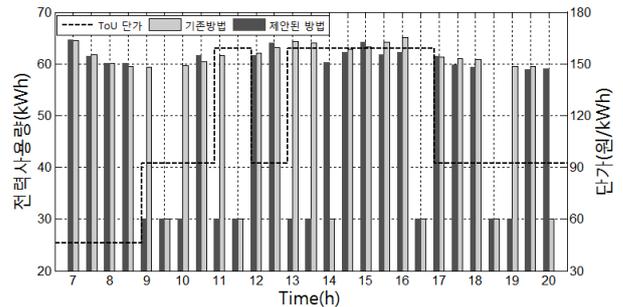


그림 6 시간대별 전력사용량
Fig. 6 The hourly electricity consumption

기존 제어방법으로는 22일 하루 동안 $1,477kWh$ 의 전력을 소비하였으며, 이때 일일 전기요금은 160,723원이 발생한 것으로 나타났다. 그러나 제안된 방법에서는 $1,342kWh$ 의 전력사용량을 소비하였으며, 최대 부하시간동안의 전력사용을 최대한 억제함으로써 약 11%가 절감된 143,254원의 전기요금이 산출된 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 그림 6에서 몇몇 구간에서 기존 제어방법에 비하여 낮은 냉수 출구온도를 보임에도 불구하고 낮은 전력사용량을 보이는 구간이 존재하였다. 이는 이전시간에 높은 수준의 냉방가동을 통하여 기존 제어방법에 비하여 보다 낮은 실내온도의 산출에 따른 실내 냉방부하 감소가 원인 것으로 분석되었다.

4.4 월간 운행결과

본 절에서는 시뮬레이션 기간을 확대하여 2010년 8월 한 달간에 대해서 기존 방법과 제안한 방법을 비교하였으며, 시

시뮬레이션 조건은 일간 시뮬레이션 조건과 동일하다. 아래의 표 1 및 그림 7, 8은 2010년 8월 한 달간의 운행결과를 보여준다.

표 1 8월의 시뮬레이션 결과 비교

Table 1 Results of the simulation for the month of August

제어 방식	기존방법	제안된 방법
월 피크전력량(kW)	176.4	146.0
월 소비전력량(kWh)	40,708.6	35,762.7
월 전기요금(원)	5,409,307	4,624,043
요금 절감률(%)		14.5

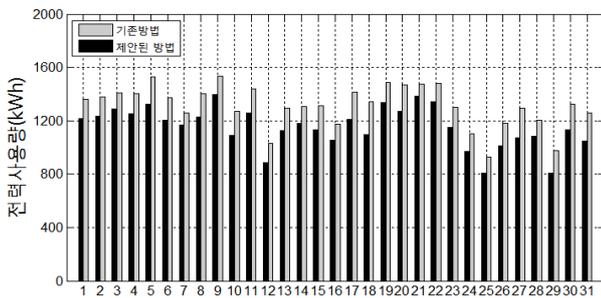


그림 7 일별 전력사용량

Fig. 7 The daily electricity consumption

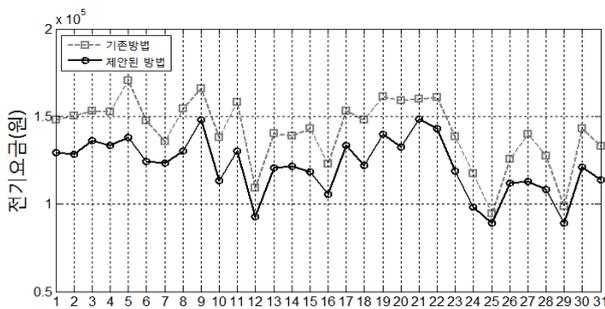


그림 8 일별 전기요금

Fig. 8 The daily electricity charge

표 1에서도 볼 수 있듯이 기존의 냉방시스템 제어방법을 적용하였을 경우, 월 총 40,708kWh의 전력을 소비하였으나 제안된 최적 제어방법을 적용한 경우 35,762kWh의 전력을 소비함으로써 약 12%의 전력사용량을 절감하는 것으로 나타났다. 또한 5,790원의 기본 요금단가를 적용한 월 총 전기요금의 경우 제안된 제어방법이 3,778,482원으로 기존방법에 비하여 약 14.5%의 요금을 절감하는 효과를 보이는 것으로 나타났다. 추가적으로 8월 중 전력 사용량 및 전기 요금 절감효과가 가장 컸던 날은 8월 5일로서 이 날의 절감 정도는 전력 사용량 13.4 %, 전기 요금 18.9 % 수준이었다. 당초 제안된 제어전략은 보다 낮은 냉수 출구온도를 사용하는 경우가 있으므로 기존방법에 비하여 다소 높은 월 피크전력을 보일 것으로 예상하였으며, 이는 실제 전기요금부분에서 기본요금을 좌우하는 부분으로 신중한 고려를 필요로 한다.

그러나 실제 시뮬레이션 결과 기존 제어방법에서 보다 높은 월 피크전력이 발생하는 것으로 나타났다. 기존 제어방법에서 월 피크부하가 발생한 시간은 8월 25일 7:30분경으로 이날은 다른 날에 비하여 상당히 낮은 실외온도를 보인 날로 냉방시스템의 가동의 필요성이 상당히 낮은 날인 것으로 분석되었다. 그러나 제안된 제어방법의 경우 실내온도 제약범위가 최대 24°C까지 여유가 있어 냉방시스템이 가동되지 않은 반면, 기존 제어방법에서는 최대 23.25°C를 만족해야하는 제약조건으로 인하여 냉방시스템이 1시간정도 가동되어 보다 큰 피크전력이 발생한 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 논문에서는 건물의 냉방시스템을 대상으로 계시별 요금제하에서 전기요금을 최소화할 수 있는 제어방법을 제안하였다. 제안된 방법은 전일 기상정보로부터 다음날의 기상 데이터를 전송받고, 이를 바탕으로 적정 실내온도를 유지하는 범위에서 전기요금을 최소화 할 수 있는 냉방시스템의 최적 냉수 출구온도를 산출한다. 서울지역의 상업용 건물을 대상으로 시뮬레이션을 실시한 결과 기존의 냉방시스템의 제어방법에 비하여 제안된 제어방법을 적용하였을 경우, 한 달간의 전력 사용량은 약 12 %가 절감되었으며, 전기요금은 약 14.5 %의 큰 절감을 보여준 것으로 나타났다. 본 논문에서는 현재 시행되고 있는 3단계 계시별 요금(일반용)을 적용하였지만, 향후 스마트그리드의 보급에 따라 요금체계가 발전 원가에 연동되는 실시간 요금제로 변화할 경우, 제안된 방법을 적용한다면 현재보다 더욱 큰 전기요금 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한 본 연구에서는 건물의 HVAC시스템 중 에너지 소비의 큰 비중을 차지하는 냉방시스템에 국한하여 에너지 절감방안을 개발하였지만 HVAC시스템의 주요 구성요소인 환기 및 난방시스템을 포함하여 전체적인 HVAC시스템의 에너지 사용 최적화를 모색하는 것도 보다 효과적일 것으로 판단된다. 향후에는 이러한 점을 고려하여 냉방부분에서의 온도제어뿐만 아니라 CO₂ 농도를 고려한 환기시스템 및 난방시스템의 제어를 종합적으로 최적화하는 모델을 개발하고자 한다.

References

- [1] Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), "Research and Survey on The Actual Condition for Electrical Energy Consumption of Commercial Buildings," Research Report, 2007.5
- [2] Lu Lu, Wenjian Cai, Yeng Chai Soh, Lihua Xie, Shujiang Li, "HVAC system optimization-condenser water loop" Energy Conversion and Management, Volume 45, Issue 4, March 2004, Pages 613-630
- [3] Lu Lu, Wenjian Cai, Lihua Xie, Shujiang Li, Yeng Chai Soh, "HVAC system optimization-in-building section," Energy and Buildings, Vol. 37, Issue 1, pp 11-22, January 2005
- [4] S. Taylor, P. Dupont, B. Jones, T. Hartman, M. Hydeman, "CoolTools Chilled Water Plant Design

and Specification Guide,” PG&E CoolTools Report CT-016, May 2000

- [5] Constantopoulos, 외 2명, “ESTIA: A Real-time Consumer control Scheme for Space Conditioning Usage Under Spot Electricity Pricing.” Computers Operations Research, vol 19, no. 8, pp 751-765, 1991
- [6] M. Komareji, J. Stoustrup, H. Rasmussen, N. Bidstrup, P. Svendsen, F. Nielsen, “Optimal Set-point Synthesis in HVAC Systems,” American Control Conference, pp 5076 - 5081, 9-13 July 2007
- [7] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Standard: ANSI/ASHRAE 55-1992
- [8] *The Math Works™*, “Optimization Tool Box4 User’s Guide”
- [9] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Standard: ANSI/ASHRAE 55-1992
- [10] Carrier, Carrier Product Sheet
- [11] <http://www.kepco.co.kr/>
- [12] <http://www.kma.go.kr/>



김 광 호 (金光鎬)

1966년 1월 17일생. 1988년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1994년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~현재 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 교수

Tel : 033) 250-6298

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr

저 자 소 개



노 성 준 (盧成俊)

1984년 10월 22일생. 2010년 2월 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 졸업. 2012년 2월 동 대학원 전기전자공학 졸업(석사). 2012년 3월~현재 롯데건설 건축사업본부 기전팀

E-mail : nohsj74@lottenc.com



전 정 표 (全晶杓)

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 졸업. 2011년 2월 동 대학원 전기전자공학 졸업(석사). 2011년 3월 ~ 현재 동 대학원 전기전자공학부 박사과정.

E-mail : jeong823@kangwon.ac.kr